رابطه خاک و گیاه / سال دوازدهم / شماره اول / بهار ۱۴۰۰ / صفحات ۱۵-۱
مقاله پژوهشی

اثر جاسمونیک‌اسید و نانوذرات سیلیسیم بر برخی صفات فیزیولوژیک توت‌فرنگی تحت تنش شوری

سامان عثمان‌پور[1]، علی‌اکبر مظفری[1و2*] و ناصر قادری[1و2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) بر برخی ویژگی‌های فیزیو-بیوشیمیایی توت‌فرنگی رقم پاروس انجام شد. بدین منظور آزمایشی با سه سطح جاسمونیک‌اسید (۰، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار)، سه سطح نانوذرات سیلیسیم (۰، ۱ و ۲ میلی‌مولار) و دو سطح کلریدسدیم (۰ و ۵۰ میلی‌مولار) به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. در این آزمایش رنگدانه‌های فتوسنتزی (PHPs)، محتوای نسبی آب برگ (MSI)، پایداری غشای سلولی (RWC)، میزان پرولین، کربوهیدرات‌های محلول کل (TSC)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، پروتئین‌های محلول کل (TSP)، فعالیت‌های آنزیمی در برگ اندازه‌گیری شدند. براساس نتایج بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشای سلولی و کربوهیدرات‌های محلول کل در تیمار ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک‌اسید به همراه ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیسیم بود. محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشای سلولی و میزان مالون دی‌آلدئید برگ توت‌فرنگی در شرایط تنش شوری نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داشتند. در شرایط تنش شوری، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک‌اسید به همراه ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیسیم توانستند ۴۷/۵ از کاهش مقدار پروتئین‌های محلول کل جلوگیری کنند. غلظت پتاسیم در شرایط تنش شوری ۴۸/۴ درصد کاهش یافت، درحالی که غلظت سدیم در همان شرایط ۵۴/۶ درصد افزایش پیدا کرد. جاسمونیک‌اسید در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار به ترتیب ۳۵/۲ و ۴۲/۳ درصد غلظت سدیم را کاهش داد. فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) رابطه مستقیمی با افزایش غلظت نانوذرات سیلیسیم داشت. جاسمونیک‌اسید و نانوذرات سیلیسیم اثر تنش شوری بر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را کاهش دادند. کاربرد جاسمونیک‌اسید و نانوذرات سیلیسیم در شرایط تنش و بدون تنش شوری سبب بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک توت‌فرنگی شدند. بهترین نتایج در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری، در کاربرد توأم ۰/۵ میلی‌مولار جاسمونیک‌اسید و ۲ میلی‌مولار نانوذرات سیلیسیم مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: جاسمونیک اسید، پاروس، تنش شوری، سیلیسیم، توت‌فرنگی

مقدمه

توت‌فرنگی با نام علمی *Fragaria x annanasa* گیاهی علفی چندساله و از خانواده گلسرخیان (*Rosaceae*) است (۸). پژوهشگران گزارش کردند که هم اکنون ۴۵ میلیون هکتار از

۱- گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
۲- مرکز پژوهشی به نژادی و به زراعی توت‌فرنگی، دانشگاه کردستان
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: a.mozafari@uok.ac.ir

۲۳۰ میلیون هکتار زمین‌های آبی جهان، تحت تأثیر شوری قرار دارند (۲۰) و تا اوایل سال ۲۰۵۰، پنجاه درصد زمین‌های کشاورزی در نتیجه افزایش شوری از بین خواهد رفت (۴).

عملکرد توت‌فرنگی در EC حدود ۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر تا پنجاه درصد کاهش می‌یابد (۱۲). یکی از راه‌های رویارویی با تنش شوری کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی مانند اسید آبسزیک، سایتوکنین، براسینوئیدها، اسید سالیسیلیک و جاسمونات‌ها است (۱۵). نقش جاسمونات‌ها در بهبود پاسخ‌های دفاعی گیاهان، راهی برای حفظ محصولات کشاورزی و رسیدن به امنیت غذایی به شمار می‌رود (۶). جاسمونات‌ها به‌عنوان پیام‌رسان در هنگام بروز انواع تنش‌ها از جمله تنش شوری عمل می‌کنند (۱۵).

تأثیر سیلیسیم بر عملکرد گیاه به‌دلیل رسوب در پهنای برگ و افزایش غلظت کلروفیل در واحد سطح برگ است، که توانایی گیاه برای استفاده از نور را افزایش می‌دهد (۴).

از آثار نامطلوب شوری می‌توان به انباشتگی بیش از حد سدیم و کلر در بافت‌ها (۱۲)، آشفتگی در غشای پلاسمایی و آسیب به اندامک‌های سلولی (۴) اشاره کرد.

اثر تنش شوری بر کاهش RWC برای بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله توت‌فرنگی در دو رقم کردستان و کوئین الیزا (۲۵) و همچنین در ارقام توت‌فرنگی کاماروزا و بایو (۱۲) گزارش شده است. تنش شوری با تولید انواع اکسیژن واکنش‌گر از طریق پراکسیداسیون لیپیدها، TSP و اسیدهای نوکلئیک باعث کاهش پایداری غشای سلولی در توت‌فرنگی ارقام سلوا، کاماروزا، تیوگا و چاندلر (۱۳) شده است.

افزایش TCH در توت‌فرنگی رقم کاماروزا تحت تنش شوری رخ داده است (۲۵). گزارش‌هایی مبنی بر افزایش TSP در اثر اعمال تنش شوری در توت‌فرنگی ارقام کورونا و کاماروزا (۲۵) وجود دارد. با افزایش مقدار شوری میزان کلروفیل و کاروتنوئید در سه رقم توت‌فرنگی (۱۲) کاهش یافته است. مقدار MDA تحت تنش شوری در دو رقم توت‌فرنگی شامل کاماروزا و بایو افزایش یافته است (۱۲). H_2O_2 افزون بر شرایط تنشی، در شرایط طبیعی هم در سلول‌های گیاهی تولید می‌شود (۱۲). افزایش غلظت FP در شرایط تنش شوری در توت‌فرنگی رقم کاماروزا (۲۵) گزارش شده است.

به‌دنبال خشکسال‌های پی‌درپی و کم‌آبی و تجمع نمک در زمین‌های کشاورزی، عواقب زیان‌بار شوری بر محصولات کشاورزی غیر قابل انکار است. با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک و وجود زمین‌های شور، ارائه راه‌حل‌هایی برای کاهش و حتی رفع این خسارت‌های ضروری است. از این‌رو، هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر غلظت‌های مختلف JA، SNA و برهم‌کنش آن‌ها در شرایط تنش شوری و بدون تنش شوری بر ویژگی‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی توت‌فرنگی رقم پاروس است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از گیاهچه‌های توت‌فرنگی رقم پاروس به عنوان مواد آزمایشی استفاده شد. سپس گیاهچه‌ها در گلخانه‌های دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان در گلدان‌های ۵ لیتری حاوی ۵۰ درصد پرلیت (با اندازه ۰/۲ تا ۲ میلی‌متر) + ۵۰ درصد کوکوپیت کشت شدند. پس از دو هفته (استقرار بوته‌ها) محلول غذایی هوگلند شامل عناصر پرمصرف و کم‌مصرف به گلدان‌ها افزوده شد. pH محلول غذایی توسط دستگاه pH متر در بازه ۵/۸ تا ۶/۵ تنظیم شد. برای تنظیم pH محلول غذایی از اسیدسولفوریک (H_2SO_4) استفاده شد. در ابتدا به هر گلدان ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول غذایی داده شد و با رشد رویشی گیاهچه‌ها مقدار محلول غذایی به تناسب رشد (هر هفته ۵ میلی‌لیتر) افزایش یافته و این عمل تا زمانی که گیاه به رشد کامل رسید (۵ ماه) ادامه یافت. از آن پس تا پایان آزمایش هر ۲ روز یک بار به هرگلدان ۲۰۰ میلی لیتر محلول غذایی داده شد.

این پژوهش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی شامل تیمارهای شوری، جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیس (SNA) در سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل شوری (NaCl) در دو سطح (صفر و ۵۰ میلی مولار)،

SNA در سه سطح (صفر، ۱و ۲ میلی‌مولار)، و JA در سه سطح (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار) بودند.

محلول کلرید سدیم با غلظت ۵۰ میلی‌مولار پس از رشد کافی (۱۵ ماه) به محلول غذایی افزوده شد و به‌صورت یک روز در میان به گیاهان داده شد. برای تیمار شاهد از آب مقطر استفاده شد. SNA به‌صورت مخلوط در محلول غذایی و به‌صورت یک روز در میان و JA به‌صورت محلول‌پاشی برگی (برای هر بوته ۲۰ میلی‌لیتر) هر دو هفته یک بار در اختیار گیاهان قرار گرفتند. طول دوره آزمایش ۶۰ روز در نظر گرفته شد.

تهیه نانو ذرات سیلیسیم

برای آزمایش نانوذرات سیلیسیم (SNA) مورد استفاده از روش ترکیب تترا اتوکسی سیلان در محیط اسیدی پلیمریزه شده سنتز شده و به‌صورت محلول کلوئیدی ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (۴/۸ میلی‌اسمول) در حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد. اندازه SNA بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر متغیر بود (۲).

اندازه‌گیری صفات

پس از تیماردهی، نمونه‌ها برداشت شده و بلافاصله با استفاده از نیتروژن مایع فریز شدند و تا زمان اندازه‌گیری، صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در فریزر ۸۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند.

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) از روش گالمز و همکاران (۱۱) استفاده شد. RWC مطابق فرمول زیر محاسبه شد:

$$RWC = \frac{(FW\text{-}DW)}{(TW\text{-}DW)} \times ۱۰۰ \qquad [۱]$$

که در آن، FW، DW و TW به ترتیب برابر وزن تازه، وزن خشک و وزن آماس برگ بر حسب گرم است. اندازه‌گیری شاخص پایداری غشاء سلولی (MSI) با استفاده از روش سایرام و همکاران (۲۶) انجام شد. برای محاسبه درصد MSI از رابطه زیر استفاده شد:

$$MSI = (1 - (C1/C2)) \times ۱۰۰ \qquad [۲]$$

که در آن C1 و C2 رسانایی الکتریکی پس از قرار گرفتن در معرض دمای به‌ترتیب ۴۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس هستند.

میزان کلروفیل کل (TCH) با روش اریگوین و همکاران (۱۸) محاسبه شد.

رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی (PHPs) با استفاده از روش لیچتنتالر و بوشمن (۲۲) اندازه‌گیری شده و با استفاده از روابط زیر میزان کلروفیل a (Ch.a)، کلروفیل b (Ch.b)، کلروفیل (a+b) (Ch.total) و کاروتنوئید (Carotenoid) برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تازه محاسبه شدند:

$$Ch.a\ (mg\ g^{-1}) = (12.25\times A663) - (2.79\times A646) \qquad [۳]$$

$$Ch.b\ (mg\ g^{-1}) = (21.21\times A646) - (5\times A663) \qquad [۴]$$

$$Ch.total\ (mg\ g^{-1}) = Ch.a + Ch.b \qquad [۵]$$

$$Car.\ (mg\ g^{-1}) = ((1000 \times A470) - (1.8 \times Ch.a) - (85.02 \times Ch.b))/198 \qquad [۶]$$

A مقدار جذب نور است که با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های بیان شده در فرمول‌های محاسبه PHPs آورده شده است.

میزان پرولین آزاد بافت با استفاده از روش باتس و همکاران (۶) و برحسب میلی‌گرم بر گرم بافت تازه برگ بالغ جوان با استفاده از منحنی استاندارد تعیین شد.

میزان پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با استفاده از روش آلکسیوا و همکاران (۵) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مالون‌دی‌آلدئید (MDA) از روش لی (۲۱) استفاده شد و میزان MDA برحسب نانومول در گرم وزن تازه بر اساس فرمول زیر محاسبه شد:

$$MDA = 6.45(A532 - A600) - 0.56\ A450 \qquad [۷]$$

طبق روش برادفورد (۷) میزان پروتئین‌های محلول کل (TSP) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز (POD) طبق روش همدا و کلین (۱۶) بر اساس فرمول زیر انجام شد:

$$Activity\ (u/ml) = \Delta A290\times 4\times VT\times Df /\ \times \varepsilon\ \ 1 \times t\times Vs \qquad [۸]$$

که در آن عدد ۴ ضریب مولکولی اجزای واکنش، Vt مقدار حجم مخلوط واکنش، Df نشان‌دهنده فاکتور رقیق‌کننده (آب

مقطر استریل)، Vs حجم عصاره آنزیمی، ε ضریب خاموشی ($26.6\ mM^{-1}\ cm^{-1}$)، t زمان (۱۲۰ ثانیه) و l طول مسیر عبور نور از مخلوط واکنش است.

فعالیت آنزیم سوپراکسیددیسموتاز (SOD) بر اساس روش دیندسا و همکاران (۹) با فرمول زیر اندازه‌گیری شد:

$$\text{SOD میزان فعالیت آنزیم} = [(\frac{(Amax-A560)}{(Amax)} \times 100)] / protein \quad [۹]$$

که در آن Amax مقدار جذب در نمونه شاهد است.

اندازه‌گیری عناصر معدنی شامل سدیم، پتاسیم از روش سوزاندن خشک و ترکیب با HCl بر اساس روش جونز (۱۹) انجام شد.

غلظت سدیم و پتاسیم در ماده خشک گیاهی برحسب میلی‌گرم سدیم / پتاسیم در گرم وزن خشک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Na/ K\ (mg/g\ dw) = (a \times b \times v) / 1000 \quad [۱۰]$$

که در آن a پی‌پی‌ام حاصل از منحنی استاندارد، b درجه رقت و v حجم عصاره حاصل از عمل هضم برحسب میلی‌لیتر است.

تجزیه آماری داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌های صفات اندازه‌گیری شده از نرم‌افزار MSTAT-C استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel 2013 صورت گرفت.

نتایج و بحث

محتوای نسبی آب برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که آثار ساده و برهمکنش‌ها دو و سه‌گانه تیمارها بر RWC معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود. کم‌ترین RWC مربوط به تیمار تنش شوری بدون حضور JA و SNA بود. RWC در شرایط تنش شوری نسبت به حالت بدون تنش کاهش معنی‌داری داشت. بیش‌ترین RWC در شرایط بدون تنش و تحت تاثیر تیمار ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه ۲ میلی‌مولار SNA مشاهده شد اما در تیمارهای صفر و ۰/۲۵ میلی‌مولار JA تیمارهای SNA تفاوت معنی‌داری با شاهد نشان ندادند (جدول ۱).

به‌علت افزایش غلظت نمک‌ها در محیط ریشه، پتانسیل آب خاک کاهش یافته، دسترسی گیاه به آب محدودتر شده و در نتیجه RWC کاهش می‌یابد (۱۴). در پژوهش حاضر RWC در شرایط تنش شوری نسبت به حالت بدون تنش کاهش معنی‌داری داشت. در شرایط تنش شوری به‌دلیل انباشتگی یون‌های سمّی در اطراف ریشه، دسترسی ریشه به آب محدود می‌شود و در واقع توانایی هدایت غشاهای ریشه یا پلاسمودسماتا مختل گشته و انتقال آب به برگ‌ها متوقف می‌شود (۲۴). پژوهش حاضر نشان داد که سیلیسیم به‌طور معنی‌داری اثر تنش شوری را تعدیل می‌کند. سیلیسیم با تجمع در سلول‌های زیرین اپیدرم باعث کاهش تعرق و از دست دادن آب از کوتیکول می‌شود و RWC را بهبود می‌بخشد (۱۴).

شاخص پایداری غشاء سلولی

براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها همه تیمارهای اعمال‌شده و برهم‌کنش آن‌ها بر MSI معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود. بیش‌ترین MSI در شرایط بدون تنش با کاربرد ۰/۲۵ میلی‌مولار JA به همراه ۱ میلی‌مولار SNA و همچنین با کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه ۲ میلی‌مولار SNA مشاهده شد. کم‌ترین MSI در شرایط تنش شوری بدون اعمال تیمارهای JA و SNA مشاهده شد. در مقایسه کلی در شرایط تنش شوری MSI نسبت به شرایط بدون تنش شوری کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۱).

میزان MSI رابطه مستقیمی با توانایی گیاهان در مقاومت به تنش‌های غیر زیستی دارد (۱۳). در پژوهش حاضر تنش شوری سبب کاهش معنی‌داری MSI نسبت به شرایط بدون تنش شوری شد. در شرایط تنش شوری، انباشتگی یون‌های سدیم و کلر باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال و افزایش نفوذپذیری غشای سلولی و در نتیجه آسیب به غشای سلولی می‌شود (۲۴). انباشتگی H_2O_2 دلیل دیگری است که پیوستگی غشای سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۴). در این بررسی

جدول ۱. مقایسه میانگین‌های کربوهیدرات‌ها کل (TCH)، پرولین آزاد (FP)، شاخص پایداری غشاء سلول (MSI) و محتوی نسبی آب برگ (RWC) توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تأثیر برهمکنش جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) تحت تنش شوری (SS) در شرایط بدون خاک.

Table 1. Means comparison of total carbohydrates (TCH), free proline (FP), membrane stability index (MSI) and relative water content (RWC) in the leaves of strawberry cv. Parus as influenced by the interaction of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) in response to salinity stress (SS) in soilless condition.

RWC (%)	MSI (%)	FP (mg g^{-1} FW)	TCH (mg g^{-1} FW)	SNA (mM)	JA (mM)	SS (mM)
58.8^{b}	73.1^{cd}	0.13^{i}	72.57^{gh}	0	0.00	
87.1^{b}	76.1^{bc}	0.52^{bc}	90.30^{f}	1		
86.8^{b}	72.9^{cd}	0.26^{gh}	97.19^{f}	2		
81.9^{cd}	75.4^{bc}	0.22^{h}	53.13^{i}	0	0.25	
81.7^{cd}	80.8^{a}	0.45^{cd}	98.05^{f}	1		0
83.02^{c}	71.3^{d}	0.30^{fg}	237.60^{b}	2		
80.5^{d}	75.3^{bc}	0.23^{e-g}	198.70^{c}	0	0.50	
81.5^{cd}	74.6^{c}	0.39^{de}	174.00^{d}	1		
92.6^{a}	77.0^{ab}	0.26^{gh}	330.70^{a}	2		
69.1^{i}	38.7^{i}	0.28^{f-h}	71.55^{gh}	0	0.00	
75.9^{e}	53.2^{gh}	0.64^{a}	59.16^{hi}	1		
67.3^{e}	57.3^{f}	0.28^{f-h}	72.23^{gh}	2		
71.8^{e}	63.9^{e}	0.65^{a}	135.40^{e}	0	0.25	
76.6^{e}	57.8^{f}	0.46^{c-d}	72.92^{gh}	1		50
72.5^{gh}	52.1^{h}	0.35^{ef}	54.50^{i}	2		
73.4^{f-h}	65.0^{fg}	0.65^{a}	81.35^{fg}	0	0.50	
75.8^{ef}	50.4^{h}	0.38^{de}	98.22^{f}	1		
74.6^{e-g}	63.2^{e}	0.56^{b}	119.20^{e}	2		

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر اساس آزمون LSD ندارند.

In each column, means with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

در شرایط تنش شوری حضور سیلیسیم سبب افزایش معنی‌دار پایداری غشای سلولی نسبت به شاهد شد. افزایش پایداری غشای سلولی در حضور سیلیسیم می‌تواند به‌دلیل رسوب سیلیسیم در غشاهای سلولی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ممانعت از پراکسید شدن غشای پلاسمایی و کاهش نفوذپذیری غشاء باشد (۴).

میزان پرولین آزاد

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر شوری، JA و SNA و برهم‌کنش دو گانه و سه‌گانه معنی‌دار ($p \leq$ ۱ درصد) بود. کم‌ترین میزان پرولین آزاد (FP) مربوط به شاهد در شرایط بدون تنش و تیمارهای صفر و ۲ میلی‌مولار SNA در شرایط تنش شوری بود. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری، در تیمار۱ میلی‌مولار SNA، با افزایش غلظت JA میزان FP روند نزولی نشان داد. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری، با افزایش غلظت JA میزان FP نیز افزایش نشان داد. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش، تیمار ۱ میلی‌مولار SNA ۷۸ درصد FP را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۱).

افزایش تجمع FP در شرایط تنش شوری به‌خاطر تحریک تولید FP از اسیدگلوتامیک و توقف انتقال آن از طریق آوند آبکش و نیز جلوگیری از اکسیداسیون آن در شرایط تنش است (۲). در این بررسی میزان تولید FP تحت شرایط تنش شوری در شاهد و در تیمارهای اعمال‌شده بیش‌تر از شرایط بدون تنش بود. پژوهشگران دلیل انباشتگی بیش از حد FP در شرایط تنش شوری را فعال‌شدن آنزیم‌های بیوسنتز FP در اثر تنش شوری بیان می‌کنند (۴). در بررسی حاضر نیز در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری با افزایش غلظت JA میزان FP نیز افزایش یافت.

کربوهیدرات‌های محلول کل

اثر همه تیمارهای اعمال‌شده بر مقدار کربوهیدرات‌های محلول کل (TCH) معنی‌دار ($p < ۰/۰۱$) بود. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار TCH مربوط به تیمار ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه ۲ میلی‌مولار SNA بود. تنش شوری به‌طور معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) سبب کاهش میزان TCH شد. با افزایش غلظت JA در شرایط بدون تنش شوری میزان TCH نیز افزایش یافت (جدول ۱).

افزایش TCH در شرایط تنش شوری به‌دلیل تبدیل مولکول‌های بزرگ‌تر مانند نشاسته و ساکارز به مولکول‌های کوچک‌تر مانند گلوکز و فروکتوز، کاهش مصرف قند در گیاه و کاهش رشد و توسعه سلول‌ها است (۳). پژوهش حاضر بر خلاف نتایج پژوهش‌های مورد اشاره نشان داد که غلظت TCH در شرایط تنش کاهش معنی‌داری دارد. حضور JA در شرایط تنش شوری می‌تواند علت تفاوت نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایر پژوهشگران باشد. سیلیسیم ذخیره TCH را در شرایط تنش شوری به‌منظور انجام فرآیندهای متابولیک در حد بهینه نگه می‌دارد و گیاهان را از تخریب اکسیداتیو محافظت می‌کند (۲۴). نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط بدون تنش افزایش غلظت سیلیسیم باعث افزایش مقدار TCH می‌شود. کاربرد سیلیسیم باعث افزایش رشد و سرعت در سیستم فتوسنتزی گشته و پیامدهای کمبود آب در هنگام رخداد تنش شوری را می‌کاهد که در نهایت سبب کاهش انباشتگی TCH می‌شود (۸) و آن‌ها را به اندام‌های مصرف‌کننده انتقال می‌دهد (۳).

پراکسید هیدروژن

تمام تیمارهای اعمال‌شده و برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه آن‌ها بر مقدار H_2O_2 تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) داشتند. استفاده از SNA در غلظت ۲ میلی‌مولار به همراه ۰/۲۵ میلی‌مولار JA سبب افزایش مقدار H_2O_2 شد. در شرایط تنش شوری کم‌ترین میزان H_2O_2 مربوط به غلظت ۱ میلی‌مولار SNA به همراه ۰/۲۵ میلی‌مولار JA بود. در شرایط تنش شوری SNA بدون حضور JA تأثیر منفی بر مقدار H_2O_2 داشت درحالی که در حضور JA تیمار SNA بر مقدار H_2O_2 اثر مثبت داشت (جدول ۲).

H_2O_2 از انواع گونه‌های اکسیژن فعّال است که در هنگام وقوع تنش شوری تولید می‌شوند (۴). H_2O_2 در گیاه نقش دوگانه‌ای دارد، در غلظت‌های کم به‌عنوان یک پیام حدّ واسط برای تولید سالیسیلیک‌اسید و اتیلن عمل می‌کند که سبب سازگاری بیش‌تر با شرایط تنش‌زا می‌شود (۲۰). پژوهش حاضر نشان داد که تحت تأثیر JA و SNA مقدار H_2O_2 متغیر بوده و مقادیر متفاوتی مشاهده شد. در این بررسی در شرایط تنش شوری SNA بدون حضور JA مقدار H_2O_2 را کاهش داد، اما در حضور JA تیمار SNA مقدار H_2O_2 را افزایش داد. استفاده از سیلیسیم باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های ضداکسایشی از جمله کاتالاز و پراکسیداز می‌شود و از این طریق میزان H_2O_2 را کاهش می‌دهد (۱)، اما حضور JA باعث افزایش تجمع H_2O_2 می‌شود (۳۴).

مالون‌دی‌آلدئید

به‌جز اثر ساده شوری بقیه‌ی تیمارها بر محتوای MDA تأثیر معنی‌داری نداشتند. نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تیمار شوری باعث کاهش میزان MDA نسبت به شاهد شد (شکل ۱). محدودیت دسترسی گیاهان به آب تحت تنش شوری سبب بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود که به نوبه خود در سیستم فتوسنتزی اختلال ایجاد کرده و باعث تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود و با پراکسیداسیون لیپیدی غشاهای سلولی زمینه تولید MDA در گیاهان می‌شود (۱۲). گزارش‌هایی مبنی بر افزایش محتوای MDA در شرایط تنش شوری در توت‌فرنگی (۸) و در شرایط درون شیشه‌ای در گیلاس (۱۰) وجود دارد.

پروتئین‌های محلول کل

تمام تیمارهای اعمال‌شده و برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه آنها بر مقدار TSP تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) داشتند. با توجه به

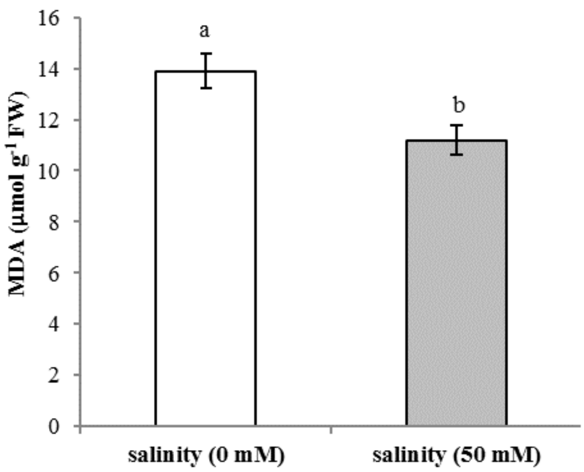
جدول ۲. مقایسه میانگین‌های فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز (POD)، سوپر اکسید دسموتاز (SOD)، پروتئین‌های محلول کل (TSP) و مقدار پراکسید هیدروژن (H_2O_2) توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تأثیر برهمکنش جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) تحت تنش شوری (SS) در شرایط بدون خاک.

Table 2. Means comparison of peroxidase (POD), superoxide desmutase (SOD), total soluble proteins (TSP) and hydrogen peroxide (H_2O_2) activity in strawberry cv. Parus as influenced by the interaction of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) in response to salinity stress (SS) in soilless condition.

H_2O_2 (µmol g^{-1} FW)	TSP (mg g^{-1} FW)	SOD (U g^{-1} protein)	POD (µM H_2O_2 min^{-1} mg^{-1} protein)	SNA (mM)	JA (mM)	SS (mM)
1.55^{de}	0.43^{b-d}	3.8^{e}	2.20^{c-e}	0		
1.67^{de}	0.36^{de}	3.6^{e}	2.76^{bc}	1	0.00	
1.51^{de}	0.39^{c-e}	3.4^{e}	2.03^{c-e}	2		
1.87^{cd}	0.44^{a-d}	3.3^{e}	2.39^{b-d}	0		
1.58^{de}	0.52^{a}	3.3^{e}	1.84^{de}	1	0.25	0
1.45^{de}	0.46^{a-c}	3.6^{e}	1.84^{de}	2		
1.13^{e}	0.45^{a-d}	$3.^{3e}$	1.47^{e}	0		
1.90^{cd}	0.51^{ab}	3.4^{e}	2.21^{c-e}	1	0.50	
1.73^{d}	0.51^{ab}	3.4^{e}	2.58^{b-d}	2		
3.13^{a}	0.25^{fg}	4.4^{c-e}	3.68^{a}	0	0.00	
2.58^{ab}	0.26^{fg}	5.6^{c}	3.13^{ab}	1		
2.51^{b}	0.21^{gh}	5.3^{f}	2.39^{b-d}	2		
2.64^{ab}	0.26^{fg}	6.6^{a}	1.84^{de}	0		50
2.76^{ab}	0.14^{h}	6.6^{b}	2.03^{c-e}	1	0.25	
2.55^{b}	0.15^{h}	4.1^{g}	2.39^{b-d}	2		
2.43^{bc}	0.36^{de}	6.1^{d}	2.21^{c-e}	0	0.50	
2.85^{ab}	0.18^{gh}	3.4^{g}	2.59^{b-d}	1		
2.53^{b}	0.32^{ef}	4.4^{e}	2.29^{c-e}	2		

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر اساس آزمون LSD ندارد.

In each column, means with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).



شکل ۱. مقایسه میانگین‌های اثر تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار بر مالون دی‌آلدئید (MDA) در توت‌فرنگی رقم پاروس در شرایط کشت بدون خاک. ستون‌های دارای حروف متفاوت بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 1. Means comparison of the effect of 50 mM salinity stress on malondialdehyde (MDA) in strawberry cv. Parus under soilless conditions. Columns with dissimilar letters are significantly different (LSD, $p < 0.05$).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها کم‌ترین میزان TSP در شرایط تنش شوری در تیمار ۲ میلی‌مولار JA به همراه ۱ و ۲ میلی‌مولار SNA به‌دست آمد. محتوای TSP در شرایط تنش شوری در مقایسه با شرایط بدون تنش کاهش معنی‌داری داشت. در شرایط تنش شوری، تیمار ۲ میلی‌مولار SNA به همراه ۰/۵ میلی‌مولار JA اثر تنش شوری بر مقدار TSP را ۴۷/۵ درصد کاهش دادند. در شرایط بدون تنش تیمار JA به‌تنهایی و تیمار ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه غلظت‌های ۱ و ۲ میلی مولار بیش‌ترین میزان TSP مشاهده شد. در شرایط بدون تنش در غلظت‌های صفر و ۱ میلی‌مولار با افزایش غلظت SNA میزان TSP روند کاهشی نشان داد، اما در تیمار ۲ میلی‌مولار JA با افزایش غلظت SNA، میزان TSP روند افزایشی نشان داد (جدول ۲).

پروتئین‌ها به‌عنوان یک محلول سازگار نقش مهمی در تنظیم اسمزی ایفا می‌کنند (۱۰). رابطه معکوسی بین مقدار TSP و میزان غلظت نمک در شرایط تنش وجود دارد (۱۰). تأثیر تنش شوری بر محتوای TSP در ارقام مختلف توت‌فرنگی متفاوت است (۱۳). در شرایط تنش شوری در توت‌فرنگی رقم کاماروزا (۲۵) افزایش میزان TSP مشاهده شده است و در ارقام توت‌فرنگی چالندر و تیوگا (۱۳) میزان TSP کاهش یافته است. در پژوهش حاضر سیلیسیم سبب افزایش میزان TSP شد. یکی از آثار چشمگیر کاهش میزان TSP در گیاهان، حمله رادیکال‌های آزاد است. سیلیسیم باعث کاهش آثار تنش اکسیداتیو و مهار رادیکال‌های آزاد می‌شود و با تحریک سنتز mRNA و کمک به جذب پتاسیم محتوای TSP را در گیاهان افزایش می‌دهد (۱۰). در این بررسی در شرایط تنش شوری JA سبب افزایش میزان TSP شد.

فعالیت آنزیم پراکسیداز

اثر ساده شوری، برهم‌کنش JA در SNA ، شوری در SNA و اثر سه‌گانه شوری در JA در SNA معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) شدند. اثر ساده SNA، JA و برهم‌کنش شوری در JA بر POD معنی‌دار نبودند. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها POD در شرایط تنش شوری افزایش یافت و غلظت ۱ میلی‌مولار SNA بیش‌ترین تأثیر را نشان داد. در شرایط بدون تنش غلظت صفر میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۱ و ۲ میلی‌مولار نشان نداد (جدول ۲). بیش‌ترین POD در غلظت ۰/۲۵ میلی‌مولار JA به همراه ۲ میلی‌مولار SNA در شرایط بدون تنش مشاهده شد. در شرایط بدون تنش در تیمارهای صفر و ۰/۲۵ میلی‌مولار JA، با افزایش غلظت SNA فعالیت POD روند افزایشی نشان داد. اما در تیمار ۰/۵ میلی‌مولار JA تا غلظت ۱ میلی‌مولار SNA روند افزایشی ولی در غلظت ۲ میلی‌مولار دوباره فعالیت POD کاهش یافت (جدول ۲).

فعالیت POD در شرایط تنش شوری امکان دارد افزایش یابد یا تغییرات کمی داشته باشد (۱۰). پژوهشگران افزایش POD را در شرایط تنش شوری در سه رقم توت‌فرنگی (۱۳) و گیلاس (۱۰) گزارش کرده‌اند. در این پژوهش نیز در شرایط تنش شوری، POD نسبت به شرایط بدون تنش افزایش یافت. سیلیسیم در بیش‌تر گیاهان سبب تحریک آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌شود (۱۰). این بررسی نشان داد که در شرایط بدون تنش شوری، SNA همراه با JA و بدون JA سبب افزایش POD شد. سیلیسیم باعث افزایش POD، کاتالاز، SOD تحت تنش شوری شده است (۲۰).

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

اثر شوری، برهم‌کنش JA در SNA ، شوری در SNA و اثر سه‌گانه شوری در JA در SNA معنی‌دار ($p < ۰/۰۵$) شدند. اثر ساده SNA، JA و برهم‌کنش شوری در JA بر POD معنی‌دار نبودند.

بیش‌ترین فعالیت آنزیم SOD مربوط به تیمار ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه ۲ میلی‌مولار SNA در شرایط تنش شوری بود. بر اساس نتایج این پژوهش، تنش شوری ۵۰ میلی‌مولار باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم SOD شد. در پژوهش حاضر فعالیت آنزیم SOD در شرایط تنش شوری بیش‌تر از شرایط بدون تنش بود (جدول ۲).

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی (PHPs) (کلروفیل a (Ch.a)، کلروفیل b (Ch.b)، کلروفیل a+b (Ch.a+b) و کاروتنوئید (Car.)) برگ توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تأثیر برهمکنش جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) تحت تنش شوری (SS) در شرایط بدون خاک.

Table 3. Means comparison of photosynthetic pigment (PHPs) (chlorophyll a (Ch.a), chlorophyll b (Ch.b), chlorophyll a + b (Ch.a+b) and carotenoid (car.)) in the leaves of strawberry cv. Parus as influenced by the interaction of jasmonic acid (JA)) and silica nanoparticles (SNA) in response to salinity stress (SS) in soilless condition.

PHPs (mg g^{-1} FW)				SNA (mM)	JA (mM)	SS (mM)
Car.	Ch.a+b	Ch.b	Ch.a			
0.11^{e}	0.74^{c-e}	0.02^{g}	0.71^{e-h}	0		
0.17^{c-e}	0.99^{a}	0.02^{g}	0.96^{ab}	1	0.00	
0.16^{de}	0.84^{bc}	0.02^{g}	0.82^{c-e}	2		
0.21^{d-e}	0.81^{b-d}	0.02^{g}	0.79^{c-f}	0		
0.18^{c-e}	0.79^{b-e}	0.02^{g}	0.77^{d-g}	1	0.25	0
0.08^{e}	0.92^{ab}	0.02^{h}	0.92^{a-c}	2		
0.21^{b-e}	1.02^{a}	0.02^{fg}	0.99^{a}	0		
0.18^{e}	0.85^{bc}	0.02^{g}	0.84^{b-d}	1	0.50	
0.22^{c-e}	0.70^{d-f}	0.02^{g}	0.67^{f-i}	2		
0.32^{c}	0.21^{h}	0.02^{g}	0.19^{n}	0		
0.25^{e}	0.52^{g}	0.05^{e}	0.47^{kl}	1	0.00	
0.36^{b}	0.34^{h}	0.04^{f}	0.31^{mn}	2		
0.27^{d}	0.47^{g}	0.06^{de}	0.42^{lm}	0		
0.37^{b}	0.57^{fg}	0.07^{cd}	0.50^{j-i}	1	0.25	50
0.31^{c}	0.73^{c-e}	0.11^{a}	0.62^{h-i}	2		
0.39^{a}	0.66^{ef}	0.08^{bc}	0.59^{i-k}	0		
0.35^{b}	0.76^{c-e}	0.10^{a}	0.66^{g-i}	1	0.50	
0.35^{b}	0.58^{fg}	0.08^{bc}	0.51^{j-i}	2		

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر اساس آزمون LSD ندارد.

In each column, means with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

در حضور سیلیسیم، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، مانند کاتالاز و SOD افزایش می‌یابد و به‌دنبال آن غلظت گونه‌های فعّال اکسیژن کاهش می‌یابد (۴). افزایش فعالیت آنزیم SOD و آسکوربیک‌اسید پروکسیداز با کاربرد تیمار متیل‌جاسمونات در غلظت‌های کم در گیاه آرابیدوپسیس گزارش شده است درحالی که در غلظت‌های زیاد سبب کاهش فعالیت این دو آنزیم شده است (۲۳). نتایج این پژوهش نشان داد که JA در غلظت زیاد به همراه SNA سبب کاهش فعالیت آنزیم SOD شد. متیل جاسمونات سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از جمله SOD، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردکتاز، دهیدروآسکوربات ردکتاز و مونو دی‌هیدرو آسکوربات ردکتاز در تمشک شد (۴).

محتوای رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

آثار ساده JA ، SNA و برهم‌کنش دوگانه و سه‌گانه تیمارهای مورد آزمایش اثر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) بر محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل (a+b) (به استثنای اثر ساده شوری بر کلروفیل a) داشتند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده شوری و JA و نیز آثار دوگانه JA با SNA و آثار سه‌گانه شوری در JA در SNA بر مقدار کاروتنوئید تأثیر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) داشتند. بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها تیمار JA در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری سبب افزایش میزان کلروفیل a شد به‌گونه‌ای که در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار JA بیش‌ترین مقدار کلروفیل a به‌دست آمد (جدول ۳). در شرایط بدون تنش

شوری مقدار کلروفیل a در غلظت صفر میلی‌مولار SNA نسبت به غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌مولار به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری در غلظت ۰/۵ میلی‌مولار JA حضور SNA سبب کاهش مقدار کلروفیل a شد (جدول ۳).

در شرایط بدون تنش شوری میزان SNA با مقدار کلروفیل b رابطه مستقیم داشت درحالی که در شرایط تنش این رابطه معکوس بود. بیش‌ترین مقدار کلروفیل b در تیمارهای ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار JA به همراه ۱ میلی‌مولار SNA مشاهده شد (جدول ۳).

تنش شوری تأثیری بر محتوای کلروفیل (a+b) نداشت. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری غلظت ۱ میلی‌مولار SNA نسبت به تیمارهای صفر و۲ میلی‌مولار به‌طور معنی‌داری مؤثرتر بود. با افزایش غلظت JA در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری غلظت کلروفیل (a+b) روند رو به افزایشی داشت (جدول ۳).

مقدار کاروتنوئید در شرایط تنش شوری افزایش یافت. بیش‌ترین مقدار کاروتنوئید مربوط به تیمارهای JA و SNA و برهم‌کنش آن‌ها در شرایط تنش شوری بود. مقدار کاروتنوئید در شرایط بدون تنش در تمام تیمارها به‌طور معنی‌داری نسبت به شرایط تنش شوری کم‌تر بود (جدول ۳).

نتایج مختلفی مبنی بر کاهش کلروفیل a، b و کلروفیل (a+b) تحت تنش شوری در توت‌فرنگی گزارش شده است (۲۵). در پژوهش حاضر، SNA تأثیر مثبتی بر میزان PHPs داشت. تحریک فعالیت آنزیم ریبولوز بی‌فسفات کربوکسیلاز و افزایش سطح برگ، افزایش جذب عناصری مانند نیتروژن، منیزیوم و آهن در شرایط تنش شوری است (۱). سیلیسیم با انباشتگی در سلول‌های اپیدرم همبستگی مثبتی با محتوای کلروفیل b دارد (۲۵). همسو با نتایج این پژوهش، استفاده خارجی از متیل‌جاسمونات باعث کاهش آثار زیان‌بار شوری بر فتوسنتز و رشد شده است (۱۷).

میزان سدیم و پتاسیم

آثار ساده شوری، JA و برهم‌کنش‌های دوگانه شوری در JA اثر معنی‌داری ($p < ۰/۰۱$) بر مقدار سدیم و پتاسیم جذب‌شده داشتند.

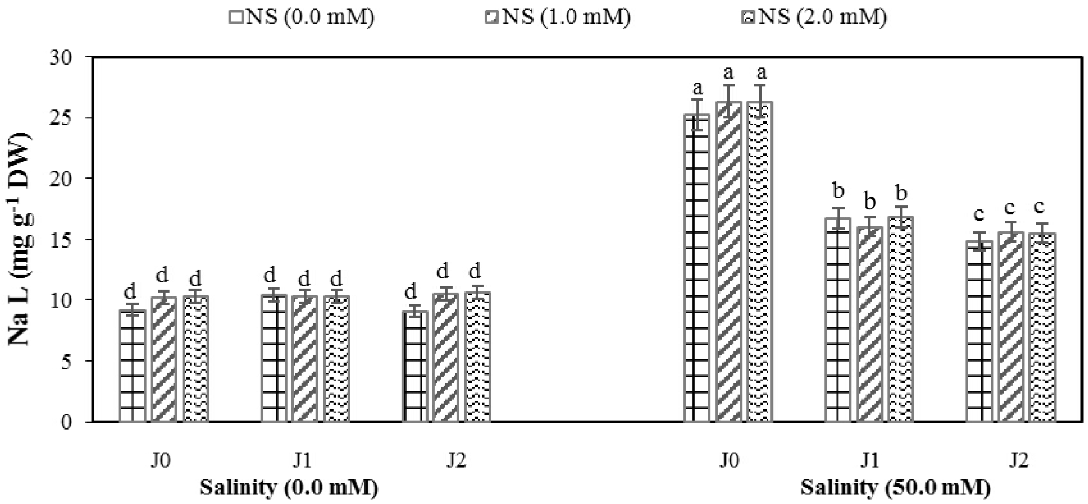
مقدار سدیم جذب‌شده در شرایط بدون تنش تحت تأثیر تیمارهای SNA و JA قرار نگرفت، اما در شرایط تنش شوری غلظت عنصر سدیم به‌شدت تحت تأثیر SNA قرار گرفت. در شرایط تنش شوری با افزایش غلظت JA غلظت سدیم کاهش یافت به‌گونه‌ای که بیش‌ترین جذب سدیم در تیمار صفر و کم ترین جذب در تیمار ۰/۵ میلی‌مولار مشاهده شد. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای SNA مشاهده نشد. بیش‌ترین غلظت سدیم در تنش شوری بدون حضور JA و کم‌ترین مقدار سدیم در شرایط بدون تنش مشاهده شد. JA در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌مولار به‌ترتیب ۳۵/۲ و ۴۲/۳ درصد غلظت سدیم را کاهش دادند (شکل ۲).

هم در شرایط تنش و هم در شرایط بدون تنش، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف (JA و SNA) از نظر غلظت پتاسیم وجود نداشت. مقدار پتاسیم در شرایط بدون تنش حدود ۲ برابر بیش‌تر از شرایط تنش شوری بود (شکل ۳).

در پژوهش حاضر، در شرایط تنش شوری میزان جذب سدیم افزایش و مقدار پتاسیم جذب‌شده کاهش یافت. دلیل کاهش غلظت سدیم در بافت‌های گیاهی به واسطه سیلیسیم به تشکیل یک لایه سیلیسیم-سلولزی در زیر لایه کوتیکول برگ، افزایش فعالیت پمپ H^+-ATPase غشای پلاسمایی و افزایش پایداری غشای سلولی در کنترل جذب عناصر غذایی است (۱).

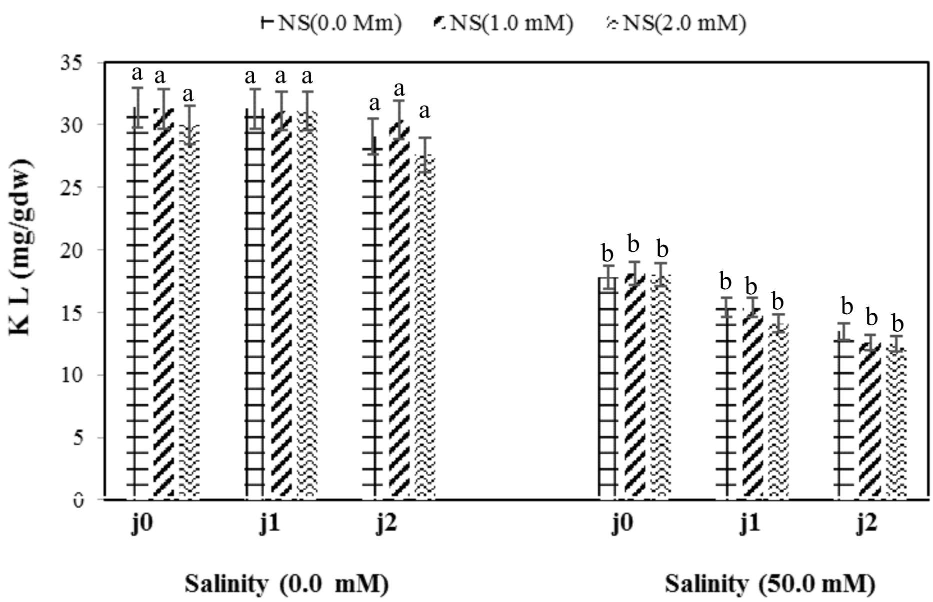
نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری سبب کاهش برخی صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مانند RWC، پایداری غشای سلولی، TCH، TSP و محتوای کلروفیل a و کلروفیل (a+b) و باعث افزایش صفات دیگر مانند محتوای کلروفیل b، کاروتنوئید، FP، H_2O_2، POD و SOD در گیاه توت‌فرنگی می‌شود. در هر دو شرایط تنش و بدون تنش شوری، کاربرد توأم ۰/۵



شکل ۲. مقایسه میانگین‌های اثر برهمکنش جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) بر غلظت سدیم برگ (Na L) در توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تنش شوری (SS) در شرایط کشت بدون خاک. J0 (جاسمونیک‌اسید صفر میلی‌مولار)، J1 (جاسمونیک‌اسید ۰/۲۵ میلی‌مولار)، J2 (جاسمونیک‌اسید ۰/۵ میلی‌مولار). ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 2. Means comparison of the interaction effect of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) on leaf sodium (Na L) of strawberry cv. Parus under salinity stress (SS) in soilless condition. J0 (0.00 mM JA), J1 (0.25 mM JA), J2 (0.5 mM JA). Columns with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).



شکل ۳. مقایسه میانگین‌های اثر جاسمونیک‌اسید (JA) و نانوذرات سیلیسیم (SNA) بر غلظت پتاسیم برگ (K L) در توت‌فرنگی رقم پاروس تحت تنش شوری (SS) در شرایط کشت بدون خاک. J0 (جاسمونیک‌اسید صفر میلی‌مولار)، J1 (جاسمونیک‌اسید ۰/۲۵ میلی‌مولار)، J2 (جاسمونیک‌اسید ۰/۵ میلی‌مولار). ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Fig. 3. Means comparison of the effect of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) on leaf potassium (K L) of strawberry cv. Parus under salinity stress (SS) in soilless condition. J0 (0.00 mM JA), J1 (0.25 mM JA), J2 (0.5 mM JA). Columns with the same letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

میلی‌مولار JA و ۲ میلی‌مولار SNA بهترین نتیجه را به همراه داشتند. SNA و JA هر کدام به‌تنهایی و یا به صورت توامان باعث تعدیل تنش شوری در گیاه توت‌فرنگی می‌شوند.

سپاسگزاری

از مرکز پژوهشی به‌نژادی و به‌زراعی توت‌فرنگی دانشگاه کردستان به‌خاطر در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی و تجهیزات مورد نیاز سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abu-Muriefah, S.S. 2015. Effects of silicon on membrane characteristics, photosynthetic pigments, antioxidative ability, and mineral element contents of faba bean (*Vicia faba* L.) plants grown under Cd and Pb stress. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 2(6): 1–17.
2. Bao-shan, L., Shao-qi, D.L., Chun-hui, F., Li-jun, Q., Shu-chun, A., Min., Y., 2004. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai Larch seedlings. *Journal of Forestry Research* 15: 138–140.
3. Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205–207.
4. Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Journal of Analytical Biochemistry* 72(1–2): 248–254.
5. Casierre-posada, F., Garcia, N., Garcia. 2005. Growth and dry matter partitioning of salt stressed strawberry cultivars (*Fragaria* sp.). *Agronomia Colombiana* 23: 83–90.
6. Dar, T.A., Uddin, M., Masroor, M., Khan, A., Hakeem, K.R., Jaleel, H., 2015. Jasmonates counter plant stress: A review. *Environmental and Experimental Botany* 115: 49–57.
7. Dhindsa, R.S., Plump-Dhindsa, P., Thorpe, T.A. 1981. Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Food Research International* 32(1): 93–101.
8. Fedina, I.S., K.M., Benderliev., 2000. Response of *Secondesmus incrassatulus* to salt stress as affected by methyl jasmonate. *Biological Planetarium* 43(4): 625–627.
9. Garriga, M., Munoz, C.A., Caligari, P.D., Retamales, J.B., Retamales. 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47.
10. Gulen, H., Turhan, E., Eris, A., 2006. Changes in peroxidase activities and soluble proteins in strawberry varieties under salt-stress. *Acta Physiologiae Plantarum* 28(2): 109–116.
11. Haghighi, M., Daneshmand, B., 2013. Comparing the effects of titanium and nano-titanium on growth and photosynthetic changes of tomato in hydroponic culture. *Journal of Soil and Plant Interactions* 4(13): 73–80.
12. Hare, J.D., Walling, L.L., 2006. Constitutive and jasmonate-inducible traits of *Datura wrightii*. *Journal of Chemical Ecology* 32: 29–45.
13. Hemeda, H.M., Kelin, B.P., 1990. Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetables extracts. *Journal of Food Science* 55(1): 184–185.
14. Horvath, E., Szalai, G., Janda, T., 2007. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling. *Journal of Plant Growth Regulation* 26: 290–300.
15. Iqbal, N., Umar, S., Khan, N.A., Khan, M.I.R., 2014. A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: regulation of proline metabolism. *Environmental and Experimental Botany* 100: 34–42.
16. Irigoyen, J.J., Emerich, D.W., Sanchez-Diaz, M., 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Journal of Plant Physiology* 84: 55–60.
17. Jamali, B., Eshghi, S., Kholdebarin, B., 2014. Response of strawberry ‘Selva’ plants on foliar application of sodium nitroprusside (nitric oxide donor) under saline conditions. *Journal of Horticultural Research* 22(2): 139–150.
18. Kafi, M., Nabati, J., Zare Mehrjerdi, M., 2011. Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) MOENCH . *Pakistan Journal of Botany* 43(5): 2457–2462.
19. Keutgen, A.J., Keutgen, N., 2003. Influence of NaCl salinity stress on fruit quality in strawberry. *Acta Horticulturae* 609: 155–157.
20. Khayyat, M., Tehranifar, A., Davarynejad, G.H., Sayyari-Zahan, M.H., 2014. Vegetative growth, compatible solute accumulation, ion partitioning and chlorophyll fluorescence of ‘Malas-e-Saveh’and ‘Shishe-Kab’ pomegranates in response to salinity stress. *Photosynthetica* 52(2): 301–312.

21. Mahdavi, M., Safari, H., 2015. The effect of chitosan on growth and some physiological characteristics of chickpea under salinity stress. *Journal of Plant Process and Function* 12 (4): 127–117.
22. Maksymiek, W., Krupa, Z., 2002. Jasmonic acid and heavy metals in Arabidopsis Plants, A similar physiological response to both stress. *Journal of Plant Physiology* 159: 509–515.
23. Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H.R., Aghdasi, M., 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25(2): 192–201.
24. Rahimi, A., Biglarifard, A., 2011. Influence of NaCl salinity and different substracts on plant growth, mineral nutrient assimilation and fruit yield of strawberry. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39(2): 219–226.
25. Saied, A.S., Keutgen, A.J., Noga, G., 2005. The influence of NaCl salinity on growth, yield and fruit quality of strawberry cvs. 'Elsanta'and 'Korona'. *Scientia Horticulturae* 103(3): 289–303.
26. Salim, B.B., 2014. Effect of boron and silicon on alleviating salt stress in maize. *Journal of Agriculture Research* 3(4): 1196–1204.

The Effect of Jasmonic Acid and Silica Nanoparticles on Some Physiological Traits of Strawberry under Salinity Stress

S. Osmanpour[1], A.A. Mozafari[1,2]* and N. Ghaderi[1,2]

(Received: 2 January 2021; Accepted: 9 February 2021)

Abstract

This study was conducted to investigate the effect of jasmonic acid (JA) and silica nanoparticles (SNA) on some physio-biochemical traits of strawberry cv. Parus. Three levels of JA (0, 0.25 and 0.5 mM) and three levels of SNA (0, 1, and 2 mM) incorporated in the nutrient solution plus two sodium chloride treatments (0 and 50 mM) were tested. The experimental factors were set up according to a completely randomized design with three replications. Traits measured included content of photosynthetic pigments (PHPs), proline, total soluble carbohydrates (TSC), hydrogen peroxide (H_2O_2), total soluble proteins (TSP), the level of membrane stability index (MSI), relative water content (RWC), peroxidase (POD) and enzyme activities. Results showed that the highest RWC, MSI and TSC were obtained at 0.5 mM JA and 2 mM SNA treatments under control salinity, while these traits were the lowest under salinity stress with no treatment application. The application of 0.5 mM JA and 2 mM SNA increased RWC and TSP under salinity up to %47.5. The K absorption was decreased significantly under salt stress (%48.4), while the Na uptake increased by %54.6. The JA at 0.25 and 0.5 mM decreased Na absorption by %35.2 and %42.3, respectively. On the other hand, the activity of POD was directly correlated with silicon nanoparticles concentrations. The JA and SNA alleviated the deleterious effect of salinity on PHPs. In general, the implementation of JA and SNAs could improve physiological traits under both salinity stress and non-stress conditions as the best results were obtained at higher application of JA and SNA.

Keywords: Jasmonate, Parus, Salinity stress, Silica, Strawberry.

Background and Objective: It has been documented that 45 million hectares of the world's 230 million hectares of irrigated lands are currently negatively affected by salinity (4). Strawberry is a sensitive plant to salinity and its performance is strongly affected and decreased under salinity condition (2, 4). Availability of jasmones products is a way to cope with stress condition and preserve crops' yield (1). The effect of sodium chloride on plant yield is due to sedimentation and increased chlorophyll concentration in the leaf area, which increases the plant's ability to use light. Moreover, the positive effects of silicon against various stresses can be due to increased photosynthesis, decreased sodium absorption, and increased enzymes activities (3).

1- Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. P.O. Box: 416, Postal code: 66177-15175. Tel: +98-087-33620552, Fax: +98-087-33620553.

2- Research Center of Strawberry Breeding and Improvement, University of Kurdistan, Sanandaj, 14 66177-15175, Iran.

* Corresponding Author, Email: *a.mozafari@uok.ac.ir*

Methods: Strawberry daughter plants of Parus cultivar were used as experimental materials. Plantlets prepared from the greenhouses of the Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, and were planted in pots containing 50% perlite + 50% cocopeat. In this research, a factorial experiment was used based on a completely randomized design with two salinity levels (zero and 50 mM), three JA (zero, 0.25 and 0.5 mM) and three SNA (zero, 1 and 2 mM) levels with three replications. The SNA used were synthesized using the tetraethoxysilane combination method in a polymerized acid medium and prepared as a colloidal solution of 10,000 ppm [4.8 milismolarity (mSMO)] in a volume of 1000 ml. The particle size of nanosilica varied between 10 and 50 nm. MSTAT-C software was used to analyze the variance and compare the means of the measured traits. The means were compared using the LSD test.

Results: It was shown that the lowest leaf RWC was related to salinity stress treatment without the presence of JA and SNA. In general, under salinity stress conditions, cell membrane stability index decreased significantly compared to conditions without salinity stress. In both stress and non-stress conditions, 1 mM treatment of SNA increased 78% free proline compared to the control. Salinity stress significantly ($p < 0.01$) reduced the amount of TSC in leaf. With increasing the concentration of JA under salinity stress conditions, TSC was increased. The content of TSP decreased significantly under salinity stress compared to non-stress conditions. Under salinity stress, treatment of 2 mM SNA plus 0.5 mM JA reduced the effect of salinity stress and revealed the reduction of TSP by 47.5%. The JA treatment in both stress and non-stress conditions increased the amount of chlorophyll a, so that at 0.5 mM JA the highest amount of chlorophyll a was obtained. The amount of sodium absorbed under non-stress conditions was not affected by SNA and JA treatments, but under salinity stress sodium absorption was strongly affected by SNA. In the present study, under salinity stress, sodium uptake increased and potassium uptake decreased.

Conclusions: The results of the present study showed that salinity stress reduced some physiological and biochemical traits such as leaf relative water content, cell membrane stability, total soluble carbohydrate content, TSP and chlorophyll a and chlorophyll (a + b) content; while it increased chlorophyll b, carotenoids, free proline, H_2O_2, POD and superoxide dismutase of strawberry plants. Moreover, SNA and JA either alone or in combination modulated salinity stress in strawberries and helped them to cope better with the negative effects of salinity.

References:

1. Dar, T.A., Uddin, M., Masroor, M., Khan, A., Hakeem, K.R., Jaleel, H., 2015. Jasmonates counter plant stress: A review. *Environmental and Experimental Botany* 115: 49–57.
2. Garriga, M., Munoz, C.A., Caligari, P.D., Retamales, J.B., 2015. Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae* 195: 37–47.
3. Mehrabanjoubani, P., Abdolzadeh, A., Sadeghipour, H.R., Aghdasi, M., 2015. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. *Pedosphere* 25(2): 192–201.
4. Khayyat, M., Tehranifar, A., Davarynejad, G.H., Sayyari-Zahan, M.H., 2014. Vegetative growth, compatible solute accumulation, ion partitioning and chlorophyll fluorescence of ‘Malas-e-Saveh’ and ‘Shishe-Kab’ pomegranates in response to salinity stress. *Photosynthetica* 52(2): 301–312.